

# 世界最大級の 60 MWh レドックスフロー電池による 系統蓄電池用の大容量交直変換システム

Large-Scale Power Conditioning System for Grid Storage Battery System with Redox Flow Battery Having World's Highest Capacity Class of 60 MWh

毛内 俊晴 MONAI, Toshiharu

須崎 久晴 SUZAKI, Hisaharu

矢野 敬二 YANO, Keiji

富士電機は、住友電気工業株式会社から、世界最大級の 60 MWh レドックスフロー電池による系統安定化実証設備のうち交直変換装置（2.5 MVA×13 バンク）とバンクコントローラ盤から成る大容量交直変換システムを受注し、北海道電力株式会社 南早来変電所に納入した。交直変換装置は、電力系統の周波数変動に対応して高速に充放電を行うガバナフリー相当制御、中央給電指令所からのリモート制御、電池状態に基づく補充放電制御などを行う。バンクコントローラ盤は、65 台ものパワーコンディショナの状態を管理し、大規模で高速な並列運転を実現する。

Fuji Electric received an order from Sumitomo Electric Industries, Ltd. for a large-scale power conditioning system consisting of power conditioning equipment (2.5 MVA × 13 banks) and storage-bank control panels, which are part of a power system stabilization demonstration facility using a redox flow battery system having the world's highest capacity class of 60 MWh. We delivered the system to the Minami-Hayakita Substation of Hokkaido Electric Power Co., Inc. The power conditioning equipment is capable of governor-free equivalent control for quick charging and discharging in accordance with the frequency fluctuation in the power system, remote control from the central load dispatching center, and supplementary discharge control depending on the battery status. The bank controller panels control the statuses of as many as 65 power conditioning sub-systems to achieve large-scale and high-speed parallel operation.

## 1 まえがき

風力発電や太陽光発電は、天候に依存するため不規則な出力変動を生じる。このため、電力系統への導入の拡大に伴って周波数などの電力品質への影響が懸念されている。こうした背景の下、電力系統における再生可能エネルギーの出力変動を抑制するため、経済産業省の“大型蓄電システム緊急実証事業”が進められている。その中で、北海道電力株式会社と住友電気工業株式会社が共同でレドックスフロー電池（RF 電池）による系統安定化実証事業を推進しており、2015 年 12 月から実証試験が行われている。系統安定化実証設備は、定格出力 15,000 kW、定格容量

60,000 kWh であり、13 バンク<sup>〈注 1〉</sup>で構成される。蓄電容量が世界最大級の設備である。

この実証設備のうち、富士電機は住友電気工業株式会社から受注した大容量交直変換システムを、2015 年 12 月に北海道電力株式会社 南早来変電所に設置した。

現在、風力発電や太陽光発電などにおいては、出力変動を抑制するため、発電所に蓄電池設備を併設することが求められるエリアも存在する。これに対して、今回納入した交直変換システムは、大規模電力系統における変動を抑制するために変電所に設置した。

本稿では、世界最大級の 60 MWh レドックスフロー電池による系統蓄電池用の大容量交直変換システムについて述

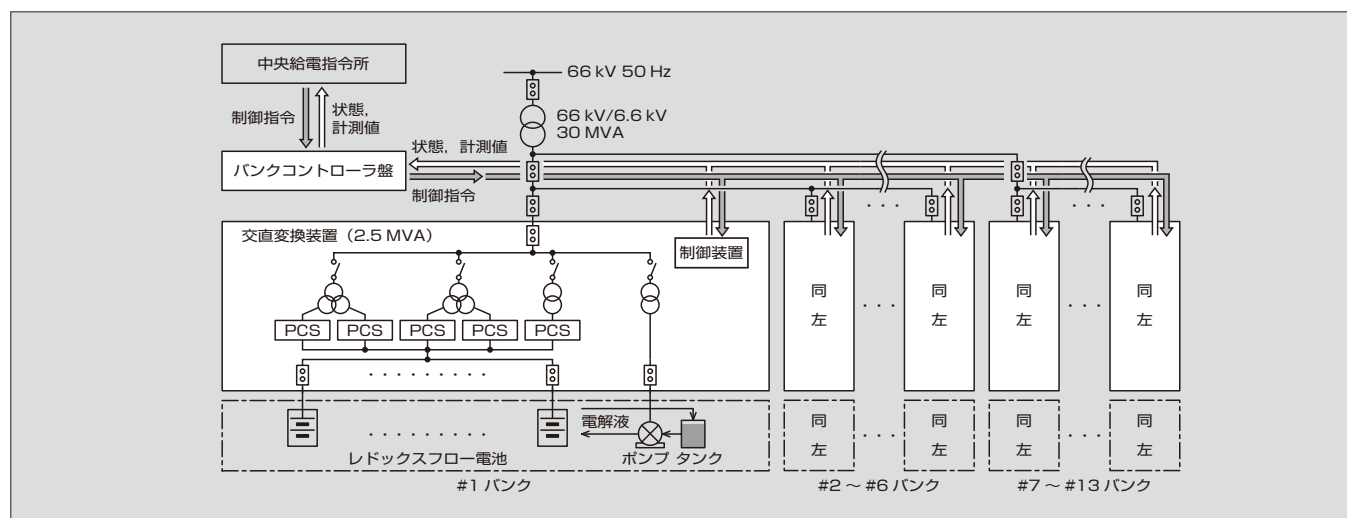


図1 交直変換システムの概要

〈注 1〉 バンク：本稿では、“バンク”を交直変換装置と、これに接続される蓄電池の組合せ単位として定義している。

べる。

## ② 交直変換システムの概要

交直変換システムの概要を図 1 に示す。蓄電池設備に用いる交直変換装置は、従来は 1 MVA 以下の小規模のものがほとんどであったが、本システムは最大出力が 30 MW と大容量である。1 バンク 2.5 MW の交直変換装置を 13 バンク分と、これらを束ねるバンクコントローラ盤で構成し、大規模で高速な並列運転を行うとともに省スペース化を実現している。

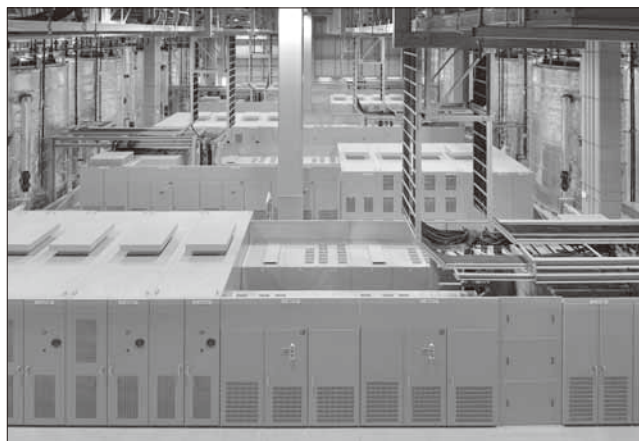


図 2 交直変換装置の設置状況

### (1) 交直変換装置

交直変換装置は、RF 電池を交流系統に連系し、ガバナフリー相当制御や中央給電指令所からの指令などに基づき充放電を行う。設置状況を図 2 に示す。

### (2) バンクコントローラ盤

バンクコントローラ盤は、中央給電指令所からの制御指令を各バンクの交直変換装置に適正に配分し、交直変換装置を制御する。

## ③ 交直変換装置の構成

1 バンク当たりの交直変換装置の構成を図 3 に、主な仕様を表 1 に示す。交直変換装置は、パワーコンディショナ (PCS) 部、高圧連系部、電池接続部で構成する。

### 3.1 PCS 部

PCS 部は、AT-NPC (Advanced T-type Neutral-Point-Clamped) 3 レベル IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールを搭載したメガソーラー用 PCS 「PVI750-3/500」をベースに、蓄電池用途に開発した「PVI800-3/600」を 5 台並列した構成であり、高効率、省スペース、低ノイズが特徴である。系統連系保護機能、FRT (Fault Ride Through) 機能、PCS 内蔵のプログラムブルコントローラ (PLC) 「MICREX-SX」を経由した上位との通信インタフェース、上位からの制御指令に対し

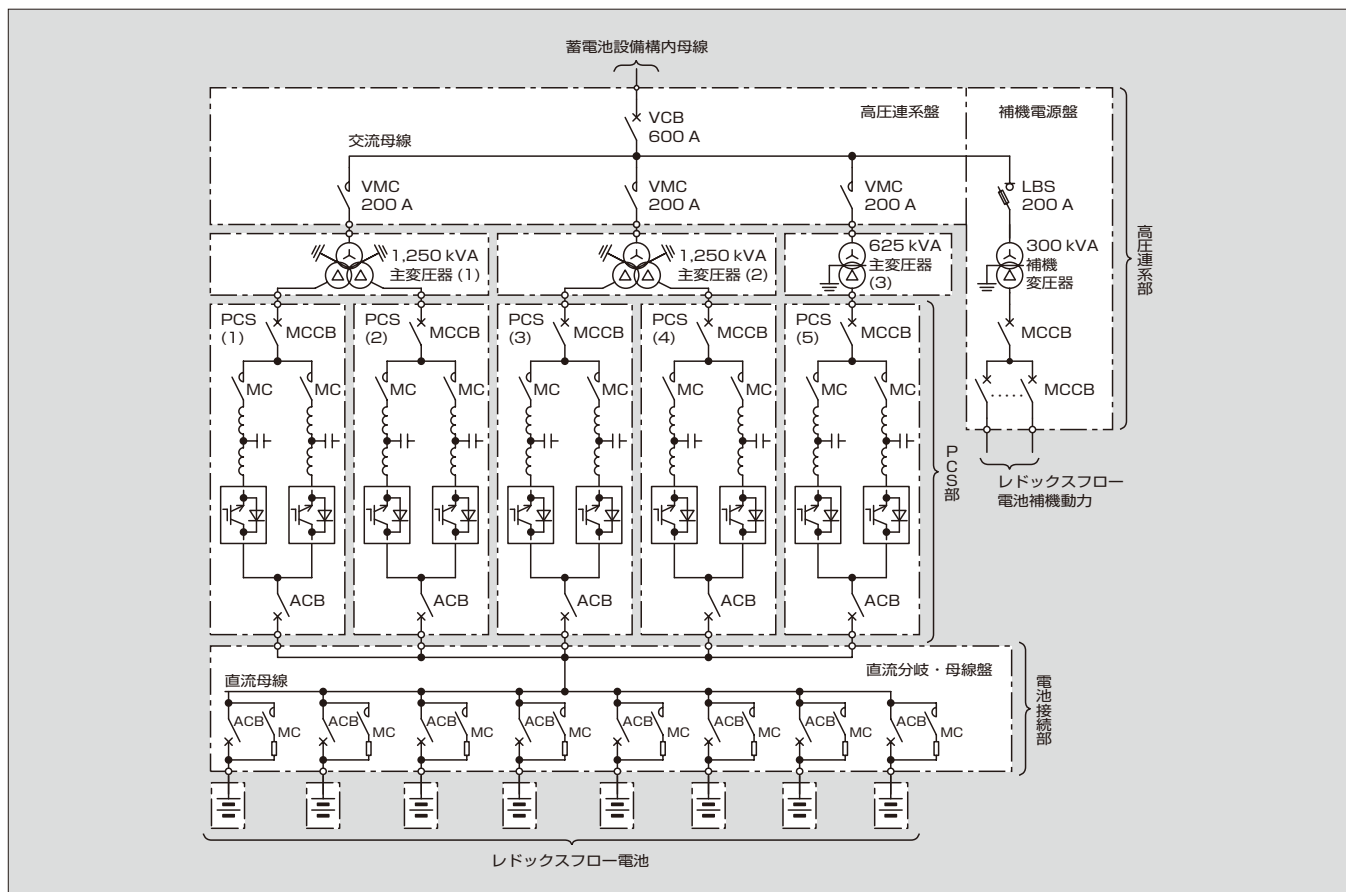


図 3 交直変換装置の構成 (1 バンク当たり)

表 1 交直変換装置の主な仕様（1 バンク当たり）

| 項 目       |            | 仕 様                            |
|-----------|------------|--------------------------------|
| 方 式       | 主回路・変換方式   | 自励式電圧正弦波 PWM                   |
|           | 制御方式       | 電圧形電流制御                        |
|           | 運転方式       | 系統連系                           |
|           | 冷却方式       | 強制空冷                           |
| 直流<br>入出力 | 直流分岐数      | 8 分岐                           |
|           | 直流電圧範囲     | DC480 ~ 750 V                  |
|           | 直流最大電流     | 連続 6,400 A (800 A × 8 並列)      |
| 交流<br>入出力 | 相 数        | 三相 3 線式                        |
|           | 定格電圧と変動範囲  | 6,600 V ± 10 %                 |
|           | 定格周波数と変動範囲 | 50 Hz ± 1 Hz                   |
|           | 交流受電端定格容量  | 2,500 kVA                      |
|           | 高調波電流含有率   | 総合 5 % 以下, 各次 3 % 以下           |
|           | 力 率        | 0.95 以上                        |
| 制御応答時間    |            | −100 % ~ +100 % にて 100 ms 以内   |
| 騒 音       |            | 70 dB 以下                       |
| 外形寸法      |            | W15,233 × D2,920 × H2,870 (mm) |

での高速な応答機能、安定に充放電を行うための出力抑制機能などを備えている。

### 3.2 高圧連系部

交直変換装置の高圧連系部は、5 台の PCS の交流出力を交流母線に集約して蓄電池設備構内母線（6.6 kV）に接続する高圧連系盤と、PCS の交流出力を昇圧するための主変圧器盤、および構内母線から RF 電池の補機動力を供給する補機電源盤で構成する。

高圧連系盤では、蓄電池設備構内母線と交流母線との接続部に高圧真空遮断器（VCB）を採用し、PCS の交流出力を交流母線に集約する回路には VCB よりも小型の真空電磁接触器（VMC）を採用した。これらによって省スペース化を実現している。

主変圧器盤では、4 台の PCS に対して 2 台の 3 巻線モールド変圧器を設置した。2 巻線モールド変圧器の場合に比べて大幅に設置スペースを削減している。また、残りの 1 台の PCS に対しては超高効率モールド変圧器を設置した。これらの組合せによって高圧連系部の高効率化を実現している。

高圧連系盤や主変圧器盤のほかに、高圧連系部の系統連系保護・装置保護に必要な保護リレーや、交直変換装置の主制御部となる PLC を備えている。高圧連系部の PLC は、ガバナフリー相当制御のほか、バンクコントローラ盤や PCS 内の PLC との通信インタフェースを担う。これらの通信には、いずれも富士電機の高速度データ通信ネットワーク「PE リンク」を採用し、省配線、省スペース、および高速な制御応答を実現している。

### 3.3 電池接続部

交直変換装置の電池接続部は、8 分岐の RF 電池を入力

するための直流分岐盤と、各分岐を直流母線に集約し、5 台の PCS に共通の直流電圧を供給するための直流母線盤とで構成する。また、電池接続部の電流や電圧を信号変換器によって検出し、高圧連系部の PLC にこれらの計測信号を入力する。

直流分岐盤は、低圧気中遮断器（ACB）、RF 電池の初期充電用回路〔抵抗と電磁接触器（MC）〕、および直流電流検出用信号変換器で構成する。直流電流検出用信号変換器を各分路に設置することにより、制御精度の向上を図っている。

直流母線盤は、DC6,400 A を通電するブスバーで主回路を構成し、この主回路に直流地絡検出装置や直流電圧検出用信号変換器を集約している。

これらの主回路構成ならびに計測機能や保護機能の配置によって、大容量の RF 電池の接続に適した直流回路を実現している。

## 4 交直変換装置の制御機能

交直変換装置の制御機能は、従来、火力発電所や水力発電所で実施されていたガバナフリー制御ならびに中央給電指令所からの指令による負荷周波数制御を、大規模な蓄電池設備で行う画期的なものである。これに加え、蓄電池の長所を生かした長周期変動抑制制御などを行っている。

### 4.1 ガバナフリー相当制御

ガバナフリー相当制御は、交直変換システムにおいて電力系統の周波数（系統周波数）を検出し、基本周波数に戻すように交直変換装置の出力を調整する短周期変動抑制制御である。系統周波数の変化と調定率から電力変化量を算出し、PID 調節器によりガバナ指令値を 10 ms ごとに生成することで、交直変換装置の出力を決定する（図 4）。

系統周波数が基本周波数よりも低い場合は、電力系統において供給が需要を下回っているため、系統周波数を増加させる方向のガバナ指令値を生成する。逆に、系統周波数が基本周波数よりも高い場合は、電力系統において供給が需要を上回っているため、系統周波数を減少させる方向の

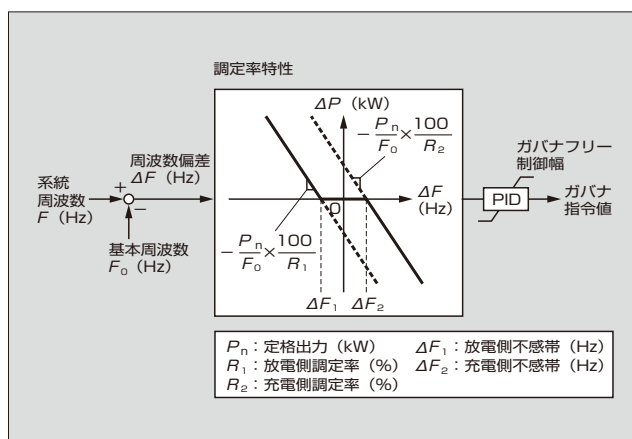


図 4 ガバナフリー相当制御の制御ブロック

ガバナ指令値を生成する。なお、交直変換装置の出力は系統周波数を検出してから 100 ms 以内で応答する。

このように、交直変換装置によるガバナフリー相当制御は、充電と放電の双方向で高速な周波数調整運転を実現している。

## 4.2 リモート制御

交直変換装置は次の制御において、中央給電指令所からの指令信号をバンクコントローラ盤経由で受信し、RF 電池の充放電についてリモート制御を行う。

### (1) 短周期変動抑制制御

複数の風力発電や太陽光発電の合成出力の短周期変動（周期 20 分以下）を緩和する変動補償制御、ならびに系統全体の需給インバランス量を水力発電所や RF 電池に配分する負荷周波数制御である。

### (2) 長周期変動抑制制御

風力発電や太陽光発電の出力予測に基づき長周期変動（周期 20 分以上）を緩和する制御である。

### (3) 下げ代不足対策運転制御

出力予測と需給計画から余剰電力の発生を回避する制御である。

### (4) 短・長周期ハイブリッド制御

短周期変動抑制制御と長周期変動抑制制御を組み合わせ、蓄電システム全体として最適な運転を行うための制御である。

## 4.3 補充放電制御

補充放電制御は、RF 電池の充電状態 SOC を検出し、補充放電特性から得られる補充放電指令値によって SOC を目標範囲に調整する制御である（図 5）。

SOC が設定値  $S_2$  よりも低い状態では充電方向の補充放電指令値となり、SOC が設定値  $S_3$  よりも高い状態では放電方向の補充放電指令値となる。補充放電指令値はガバナフリー相当制御などの電力指令値と合成し、合成後の指令値を PCS に与えることで、SOC を目標範囲に調整できる。

なお、補充放電指令値の時間変化は、設定値  $\tau$  によって電力系統に影響を与えない変化速度に調整できる。

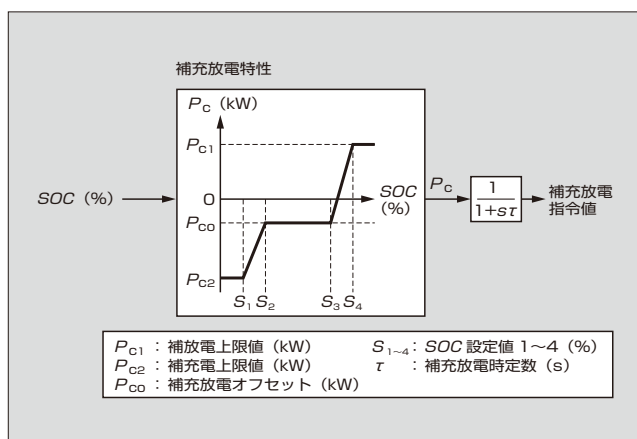


図5 補充放電制御の制御ブロック

## 4.4 初期充電とメンテナンス制御

納入時や保守時といった RF 電池の起電力が 0 V の状態において、交直変換装置から RF 電池を充電することを初期充電と呼ぶ。

初期充電においては、最初に PCS のうち 1 台は直流電圧一定制御の整流モードで、残りの 4 台は系統連系モードで運転する。系統連系モードの PCS の出力を、整流モードの PCS で発生する充電電力が減少する方向に調整しながら、抵抗を持つ初期充電回路を介して RF 電池を順次接続する。これにより、RF 電池と整流モードの PCS の突入電流はそれぞれの許容電流値以内に低減できる。

次に、突入電流がなくなった状態で、全ての電路を初期充電回路から ACB 回路に順次切り替えた後、整流モードの PCS を系統連系モードに切り替える。最後に、全ての PCS を定電力充電で運転し、RF 電池を所定の起電力まで増加させて、初期充電が完了する。

起電力が 0 V の状態の RF 電池に対して低い直流電圧を印加すれば突入電流を減少させることができるが、チョップパレスの PCS では低い直流電圧の制御は技術的に不可能である。これに対して、交直変換装置による初期充電は、前述のような複数の PCS を組み合わせた制御や、最適な抵抗値で設計した初期用充電回路の MC・ACB の開閉制御によって実現している。

また、メンテナンス制御とは、RF 電池の性能を確認するために、RF 電池の制御盤から入力される設定値や操作信号に基づいて充放電を制御するものであり、次の動作特性を持つ運転ができる。

### (1) 直流充電運転

直流定電流、直流定電力および直流定電圧の特性を持つ充電動作である。

### (2) 直流放電運転

直流定電流、交流定電力および直流定電圧の特性を持つ放電動作である。

### (3) 交流充電運転

交流定電力および直流定電圧の特性を持つ充電動作である。

### (4) 交流放電運転

交流定電力および直流定電圧の特性を持つ放電動作である。

## 5 バンクコントローラ盤の機能

バンクコントローラ盤は、並列に接続された 65 台もの PCS の状態を管理し、かつ高速で最適な制御を実現している。中央給電指令所から受信した制御情報などに対して、運転バンクの選択や出力を決定し、13 バンクの交直変換装置に制御指令を配分する。また、各バンクの運転情報などを集約して管理し、中央給電指令所に送信する。

短周期変動抑制制御において望ましい応答を得るためには、これらの制御用情報の処理や授受は迅速に行われる必

要がある。そのため、バンクコントローラ盤では、中央給電指令所や交直変換装置との通信方式、制御用計測信号の検出方式、およびバンクの運転アルゴリズムについて、高速に実行できるものを採用している。

### 5.1 中央給電指令所との双方向通信

バンクコントローラ盤は、PLC により中央給電指令所からの下り制御指令を受信し、交直変換システムの計測値や状態信号といった上り情報を中央給電指令所に送信する双方向通信機能を持つ。中央給電指令所とバンクコントローラ盤の間の通信においては専用のプロトコルを適用し、大容量蓄電池システムを使用した電力系統運用に必要な制御情報を授受している。

### 5.2 交直変換装置との双方向通信

PLC により交直変換装置の計測値や状態信号を受信し、交直変換装置への電力指令値や運転指令などの制御指令を送信する通信機能を持つ。交直変換装置とバンクコントローラ盤の間の通信においては PE リンクを採用することで、交直変換システムとしての高速な制御応答を実現している。

### 5.3 高速周波数計測装置による周波数計測

ガバナフリー相当制御の要である系統周波数は、バンクコントローラ盤の高速周波数計測装置にて検出している。高速周波数計測装置は、高性能型多用途複合計測端末「PowerSATELITE II」を高速な周波数検出に特化してカスタマイズしたものである。離島向けマイクログリッドシステム<sup>(4)</sup>でも採用しており、50 Hz 系統においては 30 ms 程度で系統周波数を検出できる。高速で検出した系統周波数信号を、各バンクの交直変換装置によるガバナフリー相当制御や、後述の一括指令運転用のガバナフリー相当制御に使用することで、周波数調整の応答性能を高めている。

### 5.4 個別指令運転

個別指令運転とは、中央給電指令所からバンクを個別に操作・制御する運転である。

負荷周波数制御などで中央給電指令所からの制御指令は、バンクコントローラ盤によって中央給電指令所が指定したバンクの交直変換装置に与えられる。この構成によって、中央給電指令所は、指定したバンクのリモート制御、ガバナフリー相当制御および補充放電制御を実行できる。

### 5.5 一括指令運転

一括指令運転とは、中央給電指令所からのバンク一括の制御指令に対して、バンクコントローラ盤の制御により複数のバンクの電池を一つの大容量蓄電池として扱う運転である。

中央給電指令所から一括指令運転の対象となるバンクとバンク一括の電力指令値が与えられると、PLC にて電力指令値の大きさなどに応じて運転バンク数を決定し、対象となるバンクのうち優先順位の高いバンクを選択すること

で起動や停止を行う。優先順位の決定には次の二つのモードを選択できる。

#### (1) スケジュール参照モード

バンクの優先順位をあらかじめ日間スケジュールに登録して、当日の運転バンクの優先順位を決定する。

#### (2) 電池状態参照モード

各バンクの RF 電池の SOC などの電池状態に基づいて、運転バンクの優先順位を随時更新する。

また、交直変換装置のガバナフリー相当制御は個別指令運転に対応しているが、バンクコントローラ盤においては一括指令運転用のガバナフリー相当制御を実装し、一括ガバナ指令値を生成することができる。

バンクコントローラ盤で生成する一括ガバナ指令値は、中央給電指令所からのバンク一括の電力指令値と合成し、バンク一括の合成指令値となる。バンク一括の合成指令値は、RF 電池の SOC などの大きさに応じて切り分け、運転中のバンクに配分する。この電力指令値がバンクごとの出力制限値を超える場合は、ほかのバンクに再配分する。これを、バンク間出力配分制御と呼ぶ。これらの指令値配分処理は PLC にて 20 ms ごとに行う。交直変換装置の出力は配分された電力指令値に追従するため、バンク一括の合成指令値に交直変換装置の合成出力を常に一致させることができる。

### 5.6 計測サーバ

計測サーバは、設備監視システム「MICREX-View PARTNER」<sup>(5)</sup>を導入したサーバ PC である。中央給電指令所との間の上り・下り情報、ならびに RF 電池や交直変換装置における状態・警報信号や計測値・制御変数をバンクコントローラ盤から Ethernet 経由で収集して一元管理を行うことにより、交直変換システム全体の運転状況を把握する。状態・警報信号の履歴表示、計測値・制御変数の 1 秒トレンド表示、CSV データでの自動保存などが可能である。トレンド表示の例を図 6 に示す。

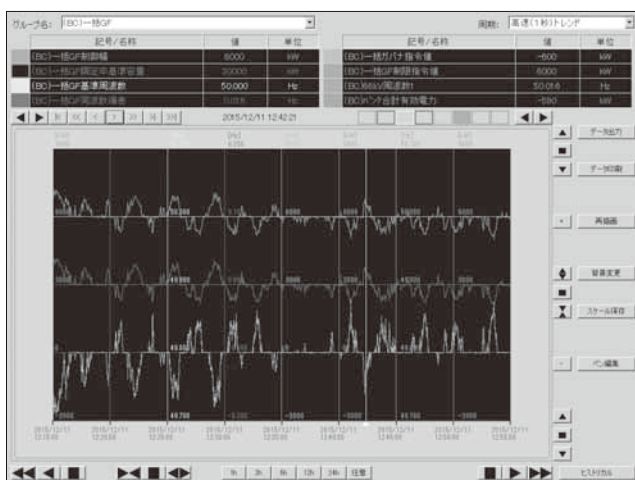


図 6 「MICREX-View PARTNER」のトレンド表示の例

〈注 2〉 Ethernet：富士ゼロックス株式会社の商標または登録商標

## 6 あとがき

本稿では、世界最大級の 60 MWh レドックスフロー電池による系統蓄電池用の大容量交直変換システムについて述べた。実証試験においては、周波数変動抑制などの効果が確認され、再生可能エネルギーの出力変動に対する新たな調整力としての成果が期待されている。

再生可能エネルギーのさらなる導入拡大のためには、特に大容量の電力貯蔵装置は電力系統に欠かせない存在であり、今後、多数導入されていくものと考えられる。富士電機では、優れた技術を積極的に取り入れ、最適な構成・制御での蓄電システムを提供することで、再生可能エネルギーの導入促進に寄与していく所存である。

最後に、大容量交直変換システムの開発、設計、製作に当たり、ご協力をいただいた北海道電力株式会社殿に深く感謝する。

## 参考文献

- (1) 多田邦彦ほか. 南早来変電所大型蓄電システム実証事業(1)－実証事業の概要について－. 平成28年電気学会電力・エネルギー部門大会予稿集. 2016, no.225, p.4-5-17-4-5-18.
- (2) 矢野敬二ほか. 南早来変電所大型蓄電システム実証事業(2)－60 MWhレドックスフロー電池システムの性能評価－. 平成28年電気学会電力・エネルギー部門大会予稿集. 2016,

no.226, p.4-5-19-4-5-20.

- (3) 中川雅之, 項東輝. 大規模太陽光発電システム技術. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.2, p.118-123.
- (4) 小島武彦, 福屋善文. 離島向けマイクログリッドシステム. 富士時報. 2011, vol.84, no.3, p.188-193.
- (5) 鈴木健浩ほか. 統合EMSと容易に連携可能な設備監視システム「MICREX-VieW PARTNER」. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.3, p.193-197.



### 毛内 俊晴

電力・エネルギー分野の電力変換システム、特に蓄電制御システムの企画・開発・エンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部社会システム事業部電力流通総合技術部課長補佐。



### 須崎 久晴

水力・風力・太陽光発電設備や電力安定化設備のプラントエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部社会システム事業部電力流通総合技術部課長補佐。



### 矢野 敬二

レドックスフロー電池システムのエンジニアリング業務に従事。現在、住友電気工業株式会社エネルギーシステム事業開発部電力貯蔵技術部。電気学会会員。





\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。